Ein Quadranten-Elektrometer von hoher Empfindlichkeit.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der

Philosophischen Fakultät II

der

UNIVERSITÄT ZÜRICH

von

Karl Mülly

aus Zürich.

Begutachtet von Herrn
Prof. Dr. *A. Kleiner.*

ZÜRICH
Druck von Zürcher & Furrer
1914.

Ein Quadranten-Elektrometer von hoher Empfindlichkeit.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der

Philosophischen Fakultät II

der

UNIVERSITÄT ZÜRICH

von

Karl Mülly

aus Zürich.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

Begutachtet von Herrn
Prof. Dr. *A. Kleiner.*

ZÜRICH
Druck von Zürcher & Furrer
1914.

Separat-Abdruck
aus der „Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich“
Jahrgang LIX (1914).

Ausgegeben am 10. Juli 1914.

Herrn Eduard Graf,

Präsident der Zürcher Kantonalbank,

in Verehrung und Dankbarkeit

gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41507225_0082

Ein Quadranten-Elektrometer von hoher Empfindlichkeit.

Von

Karl Mülly.

I. Einleitung.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem von Thomson eingeführten, von Maxwell [1]), Hallwachs [2]) und Orlich [3]) theoretisch behandelten und von A. Kleiner [4]) modifizierten Quadranten-Elektrometer.

Während man mit den im Gebrauch stehenden elektrometrischen Messinstrumenten (Quadranten-, Binanten-System, oder dem von Hoffmann 1912 konstruirten Elektrometer) höchstens über Empfindlichkeiten von 3000 bis 5000 Skt. pro Volt für zuverlässige Messungen verfügen kann, gestattet das neue Instrument, jene Empfindlichkeiten um das zehnfache zu überholen.

Neben der Beschreibung desselben und den Angaben betreffend seiner Leistungsfähigkeit, wird es die Hauptaufgabe dieser Arbeit sein, durch die Anwendungen den Nachweis der praktischen, quantitativen Brauchbarkeit der hohen Empfindlichkeiten zu liefern.

II. Beschreibung.

Die Empfindlichkeit der jetzt gebräuchlichen Thomson'schen Quadranten-Elektrometer ist wesentlich bedingt durch die Feinheit des Aufhängefadens, durch die Grösse der Längsachse der Nadel, durch das angelegte Hilfspotential und durch die Höhe der Quadrantenschachtel.

Versucht man nun aber die Empfindlichkeit durch Verwendung dünner Fäden von 0,007 bis 0,001 mm Dicke zu steigern, so werden, trotz kleinem Gewicht des Gehänges, Schwingungsdauer und Dämpfung

[1]) Maxwell, Elektr. u. Magn. (Weinstein) 1883. p. 350.
[2]) Hallwachs, Annalen der Physik. 1886. S. 1 u. ff.
[3]) Orlich, Z'schrft. für Instrumentkde. 1903. S. 97.
[4]) Vierteljahrschrift d. Naturf. Ces. Zürich 1906. S. 126.

so gross, dass keine praktischen Beobachtungen mehr möglich sind; macht man die Quadrantenschachtel niedriger, so pendelt die auf hohes Potential geladene Nadel an die Wände; verlängert man die Nadel, so wird das Trägheitsmoment derselben gross, und kürzt man für feinste Fäden die Nadellänge, so reduziert man damit auch die wirksamen Teile der Nadel, wodurch die Vorteile wieder aufgehoben werden.

Will man also die geringe Richtkraft der von Heraeus hergestellten Wollastonfäden von 3 μ bis 7 μ Dicke zu elektrometrischen Messungen mit Vorteil verwendbar machen, so muss man darnach trachten, gleichzeitig Schwingungsdauer und Dämpfung herabzusetzen durch solche Reduktion der Dimensionen der Nadel, dass dadurch wohl das Trägheitsmoment vermindert wird, die wirksamen Teile der Nadel selbst aber nicht reduziert werden.

Fig. 1. Nat. Gr.

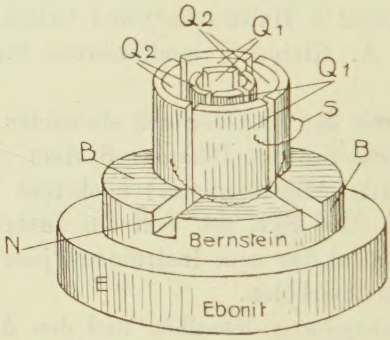

Fig. 2. Nat. Grösse.

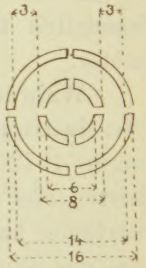

Fig. 3. Nat. Gr.

Dies ist bei dem neuen Instrument nun dadurch erreicht worden, dass man die wirksamen Teile des Systems, Nadelflügel und Quadranten vertikal gestellt hat, wie aus den Fig. 1 und 2 hervorgeht, wo Nadel und Quadranten in natürlicher Grösse skizziert sind. Diese Anordnung hat zugleich den Vorzug der übersichtlichen, raschen, gegenseitigen Orientierung von Nadel und Quadranten, wodurch die erste, grundlegende Einstellung des Instrumentes wirksam erleichtert wird.

Die Dimensionen sind aus Fig. 3 ersichtlich und so gewählt, wie sie aus vielen Versuchen sich als die günstigsten erwiesen haben. Die Höhe der Quadranten beträgt 12 mm und der Spielraum der Nadel 3 mm. Die erreichbare Empfindlichkeit ist neben dem anlegbaren Hilfspotential und den Dimensionen des Aufhängefadens auch durch die Weite der Quadranten bestimmt. So sind beispielsweise für 3 mm Nadelspielraum höhere Empfindlichkeiten erreicht worden als für 4 mm weite Quadranten.

Das Gestell, in welches die aktiven Teile des Instrumentes eingebaut sind, kann, wie Figur 4 zeigt, äusserlich die Gestalt eines gewöhnlichen Spiegelquadranten- oder Binanten- Elektrometers, z. B. des Dolezalek'schen, haben.

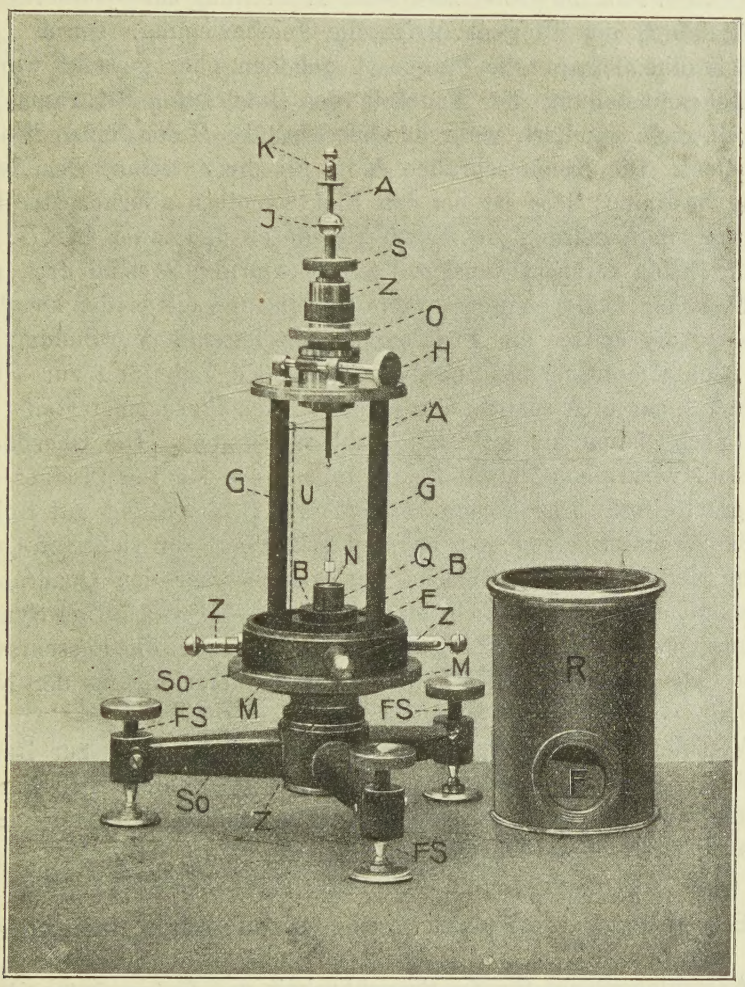

Fig. 4.

Auf der Messingplatte *M*, Figur 4, des Gestells, die drehbar auf einem mit Fusschrauben *FS* versehenen Sockel *So* ruht, ist eine Ebonitscheibe *E*, Figur 2 und 4, eingesenkt. Auf derselben befindet sich der Bernsteinsockel *B*, Figur 4, mit den konzentrisch montierten Quadrantenpaaren Q_1 und Q_2. Da, wo die Quadrantenschnitte in den Bernstein hineinreichen, ist dieser mit tiefen Nuten *N*, Figur 2, ver-

sehen, um die Oberflächenleitung auf ein Minimum herabzusetzen. Die Aufhänge- und Symmetriervorrichtungen sind auf den Trägern *G* aufgebaut, welche hoch sind, damit man lange und kurze Fäden verwenden kann.

O vermittelt die grobe, zentrische Einstellung zur Symmetrierung der Nadel, *H* der Tangentialtrieb, die Feinbewegung. Durch Lösen der Schraube *J* kann die Stange *A* gehoben oder gesenkt werden. Die Höheneinstellung der Nadel in den Quadranten-Hohlraum wird dadurch grob reguliert, während die Schraube *S* der feinen Einstellung dient. Die Klemmschraube *K* ist für die Zuleitung der Nadelladung bestimmt, doch ist bei den Elektrometern allerneuester Konstruktion die Zuleitung zur Nadel von unten und innen her *U*, Fig. 4, mit Erfolg versucht worden. Am Sockelring *So* sind drei, resp. vier Klemmen isoliert eingeschraubt, je eine für die beiden Quadrantenpaare, die dritte, die Erdklemme, als leitende Verbindung mit dem Elektrometergehäuse und die vierte als Zuleitung zur Nadel. Der Metallmantel *R* schirmt die empfindlichen Elektrometerteile luftdicht nach aussen ab, ist aber leicht abnehmbar. Die Oberflächen der nicht wirksamen Metallteile im Innern des Mantels (Träger etc.) sind geschwärzt. Das Fenster *F* dient zur Beobachtung mit Spiegel und Skala, und was von grosser Wichtigkeit ist, zur richtigen Orientierung der Nadel mit Einsicht von aussen über den Quadranten-Querschnitten; es ist luftdicht eingesetzt. Da die sorgfältige Symmetrierung eine hervorragende Rolle spielt, so müssen die Fusschrauben *FS* so fein geschnitten sein, dass sie eine Verschiebung der Nadel innerhalb von 0,1 mm möglich machen.

Von der 1906 angedeuteten Evakuationsmöglichkeit zur Reduktion der Dämpfung ist bei dem jetzigen Instrument abgesehen worden, weil die Vorteile durch Komplikationen in der Konstruktion und im Gebrauch aufgewogen würden.

III. Herstellung und Funktion der wesentlichen Bestandteile.

Ausschlaggebend für die Brauchbarkeit des Instrumentes ist die möglichst genaue Symmetrie von Quadranten und Nadel, weil infolge der Kleinheit der Dimensionen konstruktive Unregelmässigkeiten von 0,1 mm schon bedeutenden Einfluss auf die Symmetrie der Ausschläge erhalten.

Die Quadranten können entweder aus zylindrischen Rohrstücken hergestellt werden, oder dann dreht man sie mit Vorteil aus einem Messingzylinder aus. Sie werden vergoldet und auf dem Bernstein konzentrisch aufgeschraubt. Je zwei gegenüberliegende Quadrantenpaare sind durch einen Silberdraht, Fig. 2 *S*, miteinander leitend ver-

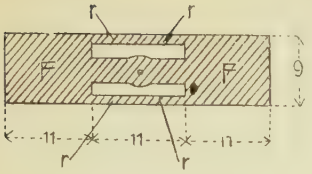

Fig. 5. Nat. Grösse.

bunden. Neuerdings hat man versucht, die Quadranten von unten her miteinander leitend zu verbinden.

Ist bei der Herstellung der Quadranten äusserste Genauigkeit erforderlich, so gilt dies auch für die klein dimensionierte Nadel. Um derselben ihre genau zylindrische Form zu geben, und zwar ohne Drücken oder Quetschen des sehr dünnen Aluminiumbleches, ist das folgende einfache Verfahren angewendet worden.

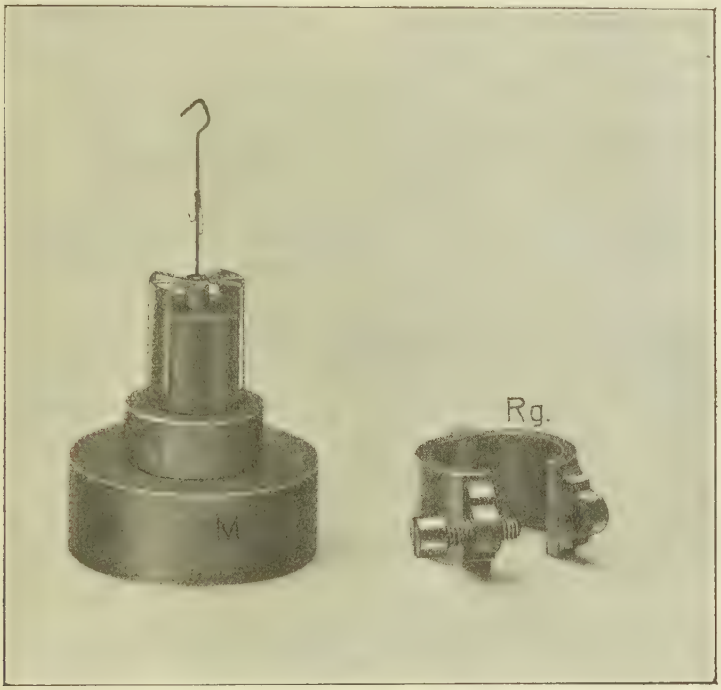

Fig. 6. Fig. 7.

Aus 0,05 mm dickem Aluminiumblech wird eine Figur von nebenstehender Gestalt, Fig. 5 in natürlicher Grösse, herausgeschnitten, wobei Ungenauigkeiten von 0,1 mm die Nadel für hohe Empfindlichkeiten ungünstig beeinflussen würden. Auf dem Messingzylinder *M*, Fig. 6, werden dann die Flügel *F*, Fig. 5, vorerst vertikal nach unten gebogen und erhalten beim weitern Biegen nach der Zylindermantelfläche durch den Ring *Rg*, Fig 6, die gewünschte symmetrisch-zylindrische Form. Dadurch richten sich die Rippen *r*, Fig. 5, von selbst nach dem Zentrum, Fig. 1. Dort werden sie durch Scheibchen

und Schraubenmutter am Aufhängestiel fest zusammengeschraubt, wobei das Scheibchen *Sb*, Fig. 8, das Verschieben, Mitdrehen oder Abbiegen der Rippen verhindert. Jetzt wird das Ganze erhitzt, damit die Flügel in ihrer zylindrischen Form stabilisiert werden. Ich habe noch andere Nadelformen konstruiert, wie Fig. 9, 10 und 11 zeigen, und mit einer Form, Fig. 11, Empfindlichkeiten von 100 000 bis 136 000 Skalenteilen pro Volt vorübergehend erreicht. Fig. 13.

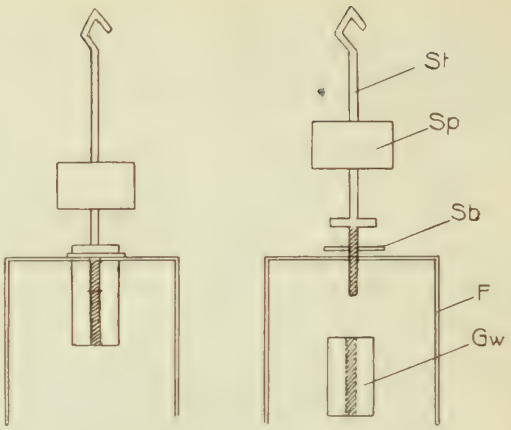

Fig. 8. Schematisch dargestellt.

Bei hohen Hilfsspannungen würde nun aber die leichte Nadel an die Quadranten angezogen und das Messen dadurch verunmöglicht.

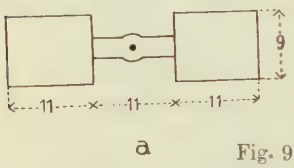

Fig. 9.

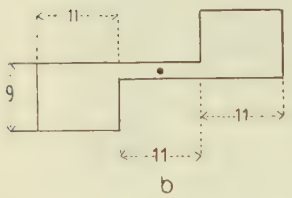

Fig. 10. Nat. Grösse.

Fig. 11.
Nat. Grösse.

Als Schraubenmutter wird deshalb ein Silber- oder Platinklötzchen von 0,1 gr bis 0,2 gr Gewicht verwendet, das, ohne das Trägheitsmoment der Nadel erheblich zu erhöhen, die wichtige Funktion hat, zu verhindern, dass nicht ganz symmetrische, elektrostatische Kräfte das Gehänge an die Quadrantenwände ziehen. Von der Grösse dieses Gewichtes, das die bewegliche Nadel in hohem Masse stabilisiert, hängt die Höhe des Nadelpotentiales ab, das man anlegen kann. Der Vergrösserung des Gewichtes wird aber durch die Tragkraft des Fadens eine Grenze gesetzt. Es ist nun gelungen, die Dispositionen

im jetzigen Instrument so zu treffen, dass bei Verwendung eines 5μ-Fadens 100 Volt an die Nadel angelegt werden können bei einer Fadenlänge von 4,5 cm. Für den 3μ-Faden bilden je nach der Länge 30—60 Volt, für den 7μ-Faden 120—150 Volt das maximale Hilfspotential. Es tritt da zwar noch nicht Kurzschluss ein, aber die elektrostatischen Kräfte überwiegen die Richtkräfte der Fäden, so dass Labilität eintritt. Die Gewichtsverhältnisse der einzelnen Nadelteile sind folgende:

Aufhängestiel, *St*	=	0,074 gr
Schraubenmutter und Schraubenklötzchen	=	0,181 „
Zwischenscheibchen, *Zw*	=	0,007 „
Alum. Nadel *F*	=	0,022 „
Spiegel, *Sp*	=	0,025 „
Totalgewicht des Gehänges	=	0,309 gr

ein Gewicht, das von den dünnsten in Betracht kommenden Fäden (3μ) noch getragen wird.

Ein Problem für sich bildete die Herstellung und Befestigung des Spiegels, der das Trägheitsmoment des Gehänges nicht merklich vermehren sollte. Es muss daher der am Nadelstiel bei *Sp*, Fig. 8, befestigte Spiegel klein oder doch sehr leicht sein. Solche kann man sich aus 0,1 mm dicken Deckgläsern herstellen. Der Spiegel, den ich vorzugsweise verwendet habe, misst 48 mm², wiegt 0,025 gr und ist am Nadelstiel so befestigt, dass er das senkrechte Hangen der Nadel kaum beeinflusst. Die Spiegel können, ohne zu stören, bis 1 cm² grosse Fläche haben. Am Trägheitsmoment der Aufhängung partizipiert er mit 0,00146 gr., also ganz unerheblich.

Das Trägheitsmoment des ganzen Gehänges selbst ist bestimmt worden,

experimentell zu	0,014	gr cm²,
rechnerisch zu	0,01388	gr cm².

Die einzelnen Teile desselben liefern dazu Beiträge wie folgt:

Nadel mit Rippen	=	0,00869 gr cm²
Nadelstange . .	=	0,00003 „ „
Belastungsgewicht	=	0,00369 „ „
Spiegel	=	0,00147 „ „
Total	=	0,01388 „ „

Um möglichst gute Isolation zu erreichen, sind die Quadranten auf Bernstein montiert, der an den Schnittstellen der Quadranten mit sich kreuzenden Einschnitten versehen ist, um den isolierenden Zwischenraum zwischen den benachbarten Quadranten zu vergrössern.

Etwa zufällig eingetretene Elektrisierung des Bernsteins ist durch jonisierte Luft zu entfernen. Die Untersuchungen betreffend Isolation haben bei 400 mm Ausschlag 2,3% Abnahme pro Minute ergeben bei 80 Volt angelegtem Potential.

Die Kapazität des Instrumentes ist seinen Dimensionen entsprechend klein und von der Grössenordnung 1—2 cm gefunden worden.

Die Schwingungsdauer wächst mit zunehmender Empfindlichkeit, d. h. mit wachsendem Nadelpotential bei gegebener Fadenlänge, ebenso die Dämpfung, so dass bei den höchsten Empfindlichkeiten 120 000 bis 130 000 Skt. pro Volt die Nadel sich aperiodisch einstellt. Bei mittleren Empfindlichkeiten, 20 000 Skt. pro Volt, kommt für den 5 μ-Faden die Nadel nach fünf Schwingungen, bei hohen, 45 000 Skt. pro Volt, nach drei Schwingungen zur Ruhe. Schwingungsdauer und Dämpfung sind grösser beim 3 μ-Faden, kleiner beim 7 μ-Faden. Die Schwingungsdauer für den 5 cm langen 5 μ-Faden beträgt 20″ bei 45 000 Skt. pro Volt Empfindlichkeit.

IV. Leistungen des neuen Instrumentes.

Die Leistungen des neuen Instrumentes gehen am besten aus einem Vergleich mit den bekannt gewordenen Angaben der besten bis jetzt im Gebrauch stehenden Spiegelquadranten-Elektrometern hervor.

	[1] Binanten Elektrom.	[2] Quadr. El. Schultze	[3] Elektrometer Hoffmann		Neues Instrument
Faden	10 μ	15 μ	3 μ	6 μ	5 μ
Fadenlänge	10 cm	20 cm	5 cm	—	5 cm
Skalenabstand	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m
Nadelpotential	80 Volt	150	—	—	100 Volt
Empfindlichkeit in Skt. p. Volt	4500	670	4500	ca. 18 000	**55 000**
Schwingungsdauer	24″	36,6″	15″	20″	20″
Kapazität	96 cm	—	4,8 cm	—	1—2 cm
Abstand der Quadrantflächen	4 mm	4 mm	—	—	3 mm
Gewicht des Gehänges	—	0,62 gr	0,0013 gr	0,004 gr	0,3 gr
Wirksame Nadelfläche	—	654 mm²	ca. 36 mm²	—	246 mm²

Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, dass allgemein die Empfindlichkeit durch die Dimension des Aufhängefadens und das angelegte Nadelpotential bedingt wird, und es ist somit durch das neue Instrument das Hauptproblem zur Erreichung hoher, praktisch

[1] F. Dolezalek. Annalen der Physik. 1908. S. 312. Bd. 26.
[2] Schultze. Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1907. S. 65.
[3] Hoffmann. Physik. Zeitschrift. 1912. S. 480 u. S. 1029.

brauchbarer Empfindlichkeiten gelöst: Reduktion des Trägheitsmomentes und der Dämpfung ohne Reduktion der elektrostatisch wirksamen Teile der Nadel. Die Angaben über Empfindlichkeit für das neue Instrument und das Quadranten-Elektrometer von Schultze beziehen sich auf die wichtigste Art der Verwendung, auf die Quadrantenschaltung, d. h. die Nadel auf hohem, ein Quadrantenpaar auf niedrigem Potential, die andern Quadranten am Gehäuse, geerdet. Wenn H. Schultze mit dem 15 μ-Faden eine Empfindlichkeit von 670 Skt. p. Volt erreicht, so hat er infolge der grossen Fadenlänge und des schweren Gewichts des Gehänges eine relativ grosse Schwingungsdauer, die ihm keine Steigerung in der Empfindlichkeit

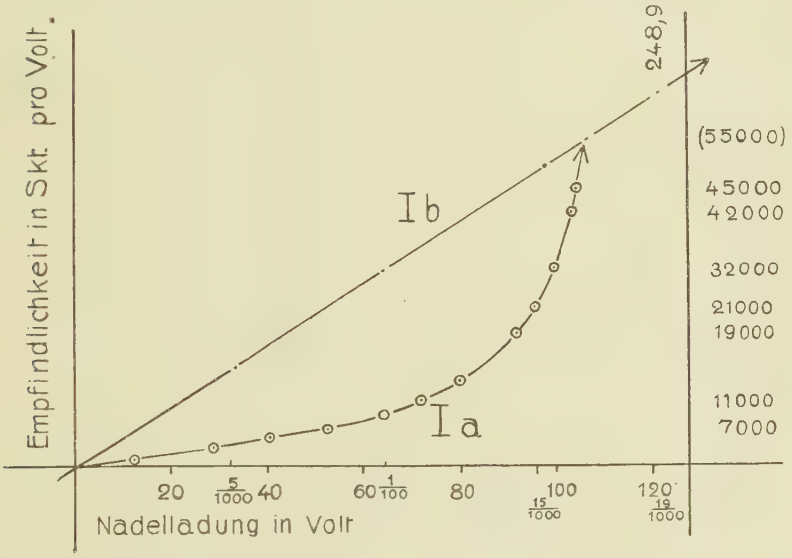

Fig. 12.

erlaubt. Hoffmann sucht durch feinste Aufhängung und Kleinheit des Gehänges zu hohen Empfindlichkeiten zu gelangen, reduziert aber dadurch gerade die elektrostatisch wirksamen Teile der Nadel (36 mm^2 gegenüber 246 mm^2 des neuen Instrumentes), wodurch die Vorteile teilweise wieder aufgehoben werden.

Mit dem neuen Instrument sind die Empfindlichkeiten für 3 μ bis 7 μ starke Fäden untersucht worden. Für den 5 μ-Faden hat sich dabei die hohe Empfindlichkeit von 45,000 Skt. pro Volt ergeben bei 102 Volt Nadelladung, $^2/_{1000}$ Volt Quadrantenladung und einem Skalenabstand von 3 m. Die Abhängigkeit der Empfindlichkeit vom Nadelpotential ist für den 5 μ-Faden und der unter Fig. 8 skizzierten Nadel in Fig. 12, Kurve Ia, graphisch dargestellt. Die Kurve Ib

veranschaulicht die Proportionalität des Nadelausschlages mit der Quadrantenladung, wenn die Nadel auf das konstante Potential von 80 Volt aufgeladen ist (Masstab 1:5). Die Empfindlichkeiten für den 3 μ- und 7 μ-Faden gehen aus den Tabellen I und II hervor.

Tabelle I.

3 μ-Faden

7 cm lang, Schwingungsdauer 30″–45″.

Nadelladung in Volt	Empfindlichkeit in Skt. p. Volt
2	750
4	1350
6	1960
8	2650
10	3315
12	3865
14	4550
16	5320
18	5985
20	6800
22	7700
24	8565
26	9495
28	10530

Tabelle II.

7 μ-Faden

6 cm lang, Schwingungsdauer 17″.

Nadelladung in Volt	Empfindlichkeit in Skt. p. Volt
100	2270
120	4928
130	6660
140	9790

Bemerkungen über Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Nadelform[1]) veranlassten mich, verschiedene Nadelformen zu konstruieren und auszuprobieren. Für die Nadelform, Fig. 9, a in Grundriss, a′ in Perspektive mit nur einer Mittelrippe, aber sonst gleichen Dimensionen und gleich tief in die Quadranten eingehängt, gestaltete sich die Steigerung der Empfindlichkeit nach Kurve I, Fig. 13, wobei das Nadelpotential wie in Kurve Ia, Fig. 12, variiert wurde.

[1]) Tätigkeitsbericht der Phys.-Techn. Reichsanstalt. Instrumentenkunde 1906.

Für die Nadel, Fig. 11, mit verlängerten Rippen endlich wurden die höchsten Empfindlichkeiten erreicht für einen 5,5 cm langen 5 μ-Faden bei tiefster Stellung der Nadel in den Quadranten, siehe Kurve II, Fig. 13. Die Schwingungsdauer für die Empfindlichkeit, 136 000 Skalenteile pro Volt, war allerdings 3 Minuten.

Wie man beim Thomson'schen Quadranten-Elektrometer die Empfindlichkeit durch Verengern oder Erweitern der Quadranten variieren kann, so gestattet das Zylinderquadranten-Elektrometer

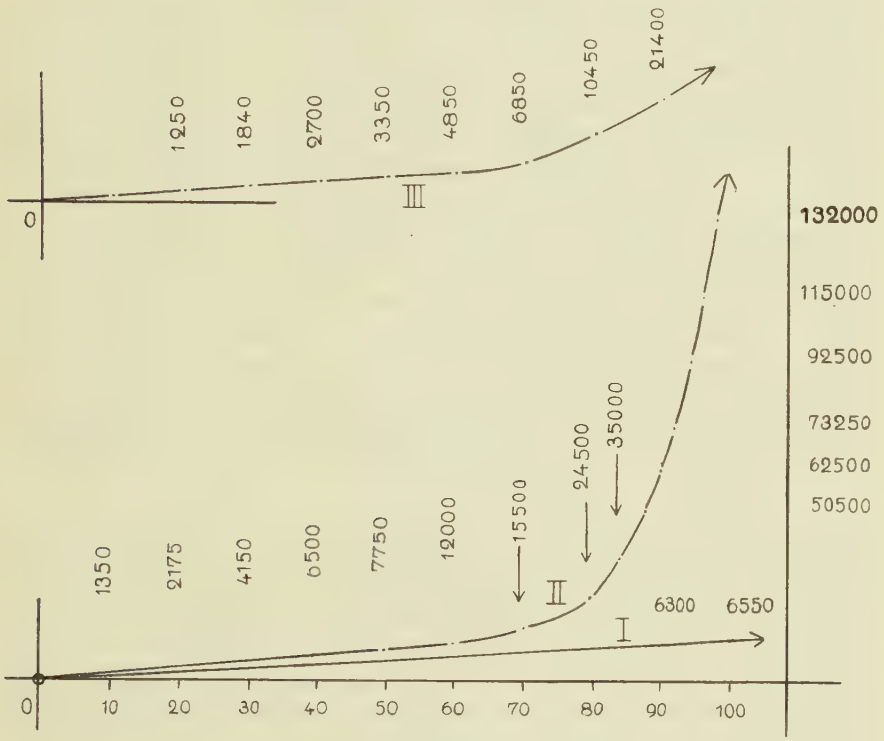

Fig. 13.

durch Heben der Nadel aus dem Quadrantenhohlraum resp. Senken in denselben die Empfindlichkeit zu vermindern oder zu steigern, vorausgesetzt, dass die vertikalen Abmessungen des Fensters hoch genug gewählt werden. Kurve III, Fig. 13, stellt die Empfindlichkeitssteigerung für eine um einige mm aus den Quadranten herausgehobene Nadel dar.

Hauptbedingung aber, zu hohen Empfindlichkeiten von 50 000 und darüber zu gelangen, ist neben der Symmetrie von Nadel und Quadranten eine äusserst sorgfältige Orientierung. Bei geerdeten Quadranten sollte ein angelegtes Nadelpotential keinen Ausschlag

erzeugen. Praktisch lässt sich diese Forderung für kleine Hilfsladungen erreichen, aber schon bei mehreren Volt treten Ausschläge auf, so dass man zu der „Hallwachs'schen Justierung auf symmetrische Ausschläge" Zuflucht nehmen muss.

Störungen in der Stabilität der Ruhelage und Konstanz der Empfindlichkeit können vor allem aus durch Luftströmungen, Temperaturveränderungen, ungleiche Bestrahlung und Beleuchtung hervorgerufen werden. Es ist deshalb notwendig, dass der Schutzmantel R, Fig. 1, und das Fenster F luftdicht verschliessen. Bei hohen Empfindlichkeiten wurden diese Strahlungen durch mehrfache Einschachtelungen abgeschirmt. Das Instrument wurde in einen Kartonzylinder, der innen mit Filz ausgekleidet war, eingehüllt. Darüber war ein zur Erde abgeleiteter, aussen glänzender, innen geschwärzter Blechkasten gestülpt. Die Zuleitungen zum Elektrometer wurden gedichtet durchgeführt, um die Luftströmungen fernzuhalten. Das Elektrometer selbst war auf einen Dreifuss mit feinen Stellschrauben aufgesetzt, und die Tangentialschraube, zur Regulierung der Nadel so eingerichtet, dass das Instrument bequem ausserhalb der Schutzhüllen symmetriert werden konnte. So gelang es, tagelange Konstanz des Nullpunktes und der hohen Empfindlichkeiten zu erreichen. Wenn es sich nur um Empfindlichkeiten bis 10 000 Skalenteile pro Volt handelt, kann man in geschützten Zimmern ohne Einschachtelungen mit Konstanz von Nullpunkt und Empfindlichkeit arbeiten.

Von dem oft empfohlenen Trocknen des Elektrometers mit Natrium muss gänzlich abgeraten werden; denn es treten neue Störungen auf nach Einführung von Natrium, Nullpunktswanderungen, welche die Konstanz der Empfindlichkeit unangenehm beeinflussen. Das Arbeiten in gewöhnlicher Zimmerluft hat sich als das Vorteilhafteste erwiesen[1]). Störungen, die bei neuen Fäden eintreten, verschwinden von selbst, wenn die Fäden wochenlang ausgehängt und ausprobiert sind. Andere Störungen wurden gelegentlich entdeckt. So kann der als Isolator verwendete Bernstein durch die Bearbeitung elektrisch geworden sein, es kann auch die Masse, mit der die nicht aktiven Elektrometerteile des Innenraumes geschwärzt werden, sehr empfindlich stören, und endlich können Staubteilchen auf Nadel und Quadranten Oberflächenleitung bewirken.

Die Konstanz der Empfindlichkeit hängt von der Konstanz der Nadelladung ab. Es muss daher die Ladebatterie[3]) vor Licht- und Wärmewirkung geschützt werden. Bei der zu den Versuchen be-

[1]) Schultze. Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1908. S. 61.
[2]) Tätigkeitsbericht der Ph. T. R. Zeitschr. f. Instrumentenkunde. 1908. S. 144.
[3]) Als Ladebatterien können die Krügerschen verwendet werden.

nützten Ladebatterie genügte die Annäherung der Hand, um die Hilfsspannung zu variieren. Dieser Einfluss ist auf Wärmestrahlung zurückzuführen. Die Zuleitungen zu den Messquadranten wurden durch mit Parafin ausgegossene Messingröhren geführt.

Beim Arbeiten mit hohen Empfindlichkeiten erwiesen sich auch die gewöhnlichen Kommutatoren als ergiebige Störungsquellen, so dass solche mit sehr geringen Dimensionen und Kapazitäten hergestellt werden mussten.

Von Bedeutung für das beschriebene Instrument ist ferner, dass sich mit demselben nicht nur 50 und weniger Millivolt messen lassen, sondern dadurch, dass man das Instrument in seiner Umkehrung verwendet, d. h. ein Quadrantenpaar erdet, das andere auf ein konstantes Potential, z. B. $^1/_{1000}$ Volt, auflädt. Legt man die zu messende Spannung an die Nadel, so ist es möglich, 1 bis 100 Volt zu messen. Der Messbereich des Instrumentes erstreckt sich somit über einen Bereich von ca. $^1/_{50000}$ Volt bis 100 Volt. Das Instrument wird bereits bei Arbeiten im Physikalischen Institut in dieser Umkehrung mit Erfolg verwendet.

V. Analytische Formulierung der Empfindlichkeitskurve.

Wenn beim Thomson'schen Quadranten-Elektrometer in Abweichung von der Maxwell'schen Formel

$$\alpha = C\,(Q_1 - Q_2)\left\{N - \frac{Q_1 + Q_2}{2}\right\}$$

die Empfindlichkeit mit zunehmendem Nadelpotential langsamer steigt, als der Proportionalität entspricht[1]), ein Maximum annimmt, dann sinkt, steigt beim neuen Instrument, wie aus dem Charakter sämtlicher Eichkurven hervorgeht, die Empfindlichkeit, besonders von einem bestimmten Ausschlag an, rascher. Das wird dann, wenn man sich das Problem gestellt hat, mit relativ niedrigen Hilfsspannungen grosse Empfindlichkeiten zu erreichen, nur angenehm sein.

Nach Orlich[2]) und Hallwachs[3]) gilt nun, wenn man die Kontaktpotentiale zwischen Quadranten und Nadel mitberücksichtigt und mit kommutierten Ausschlägen arbeitet für die Quadrantenschaltung ($Q_2 = o$, $Q_1 =$ niedriges Potential, $N =$ hoch geladen).

$$1)\quad \alpha = \frac{a_o N^2 + a_1 Q_1^2 + b_1 N Q_1 + c_o N + c_1 Q_1}{1 + D N^2}$$

für $Q_1 =$ konstant

[1]) Scholl. Physik. Zeitschrift. 1908. S. 915.
[2]) Orlich. Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1903. S. 97.
[3]) Hallwachs. Annalen der Physik. Bd. 29. 1886. S. 1.

$$2) \quad \alpha = \frac{AN^2 + BN + C}{1 + DN^2}$$

wo

$$A = a_0$$
$$B = b_1 Q_1 + C_0$$
$$C = a_1 Q_1^2 + c_1 Q_1$$

3) für $N = o$ ist $\alpha = C$.

Die Konstante C kann für die zugrunde gelegte konstante Quadrantenladung $Q = {}^2/_{300}$ Volt unterdrückt werden, sie wäre nämlich, wie sich aus der Formel ergibt, mit dem Ausschlag identisch, der sich bei geerdeter Nadel und geerdetem einen Quadrantenpaar bei Aufladung des Messquadranten auf ${}^2/_{300}$ Volt gegenüber dem völlig geerdeten Instrument ergeben würde. Dieser Ausschlag ist aber für ${}^2/_{300}$ Volt Quadrantenladung nahezu Null, so dass die Formel 2 übergeht in

$$4) \quad \alpha = \frac{AN^2 + BN}{1 + DN^2}.$$

Aus den Beobachtungen mit den alten Instrumenten nun berechnet sich D positiv, es wird die Direktionskraft immer grösser mit zunehmendem Nadelpotential, der Ausschlag wächst langsamer als die Nadelladung, erreicht ein Maximum und sinkt, wie aus der Diskussion der durch die Formel 2 dargestellten Kurve hervorgeht. Ist nun aber D negativ, so nimmt der Elektrometer-Ausschlag mit der Nadelladung schneller zu, als der Proportionalität entspricht, bis sich schliesslich, wie bei wachsender Astasierung eines Galvanometers, bei zunehmender Hilfsladung labiles Gleichgewicht einstellt. Aus verschiedenen Beobachtungsreihen, nach Orlich kommutiert, hat sich nach seinen Formeln für das neue Instrument D tatsächlich als negativ berechnen lassen.

$$D = -6 \cdot 10^{-5}.$$

Die Konstanten der Gleichung 4) lassen sich berechnen und sind nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt worden, indem man elf Beobachtungspunkte zugrunde legte.

$$A = -0{,}7189 \cdot 10^{-3}$$
$$B = \quad 0{,}689$$
$$D = -0{,}7115 \cdot 10^{-4}.$$

Die sich daraus ergebende Kurve ist in Fig. 14 zur Darstellung gebracht und die Abweichungen wegen ihrer Kleinheit in Tabelle III zusammengestellt.

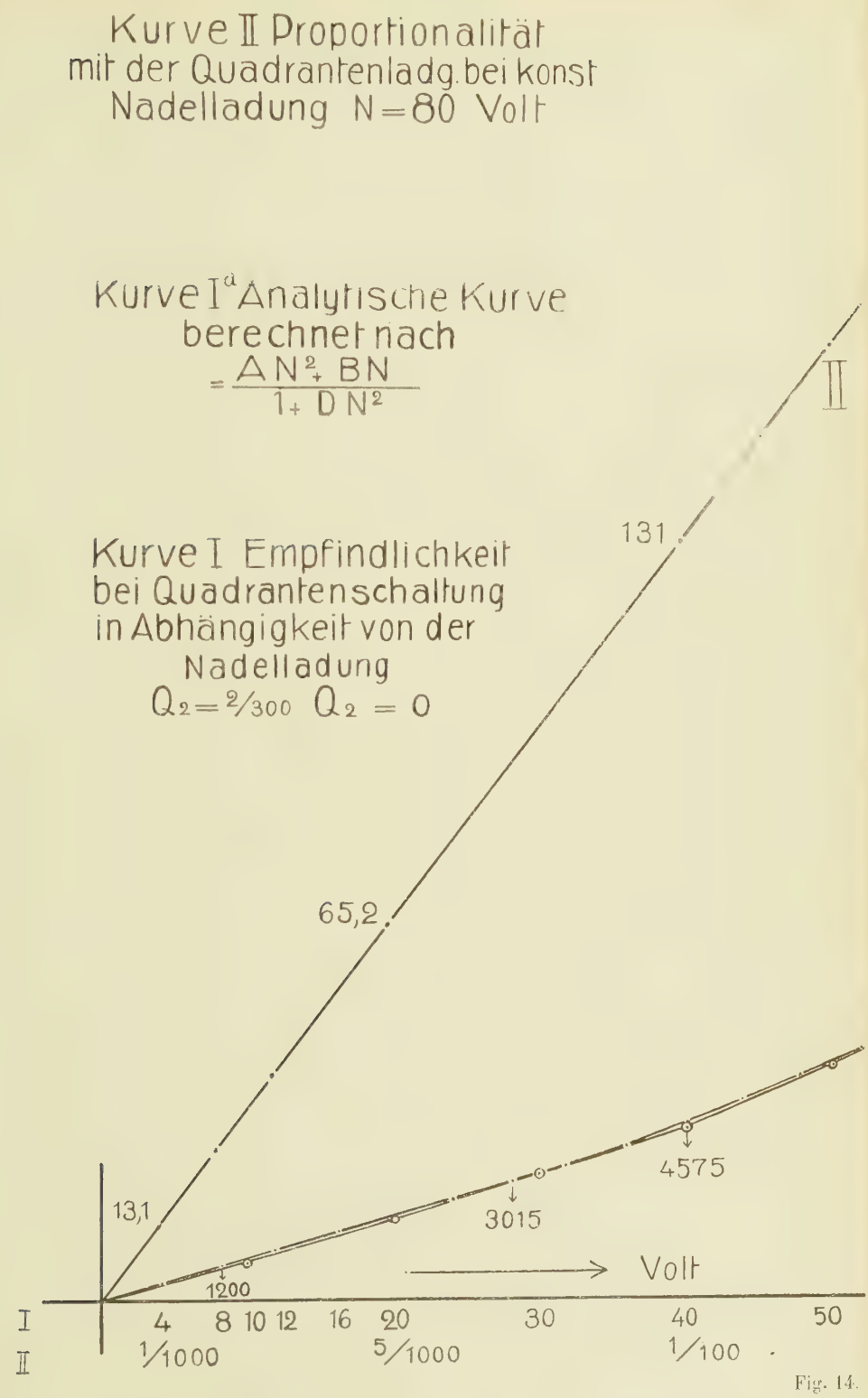
Kurve II Proportionalität
mit der Quadrantenladg. bei konst
Nadelladung N=80 Volt
Kurve I^a Analytische Kurve
berechnet nach
= AN² + BN / 1 + DN²
Kurve I Empfindlichkeit
bei Quadrantenschaltung
in Abhängigkeit von der
Nadelladung
Q₂ = 2/300 Q₂ = 0
II
131
65,2
13,1
4575
3015
1200
Volt
I
II
4
8
10
12
16
20
30
40
50
1/1000
5/1000
1/100

Fig. 14.

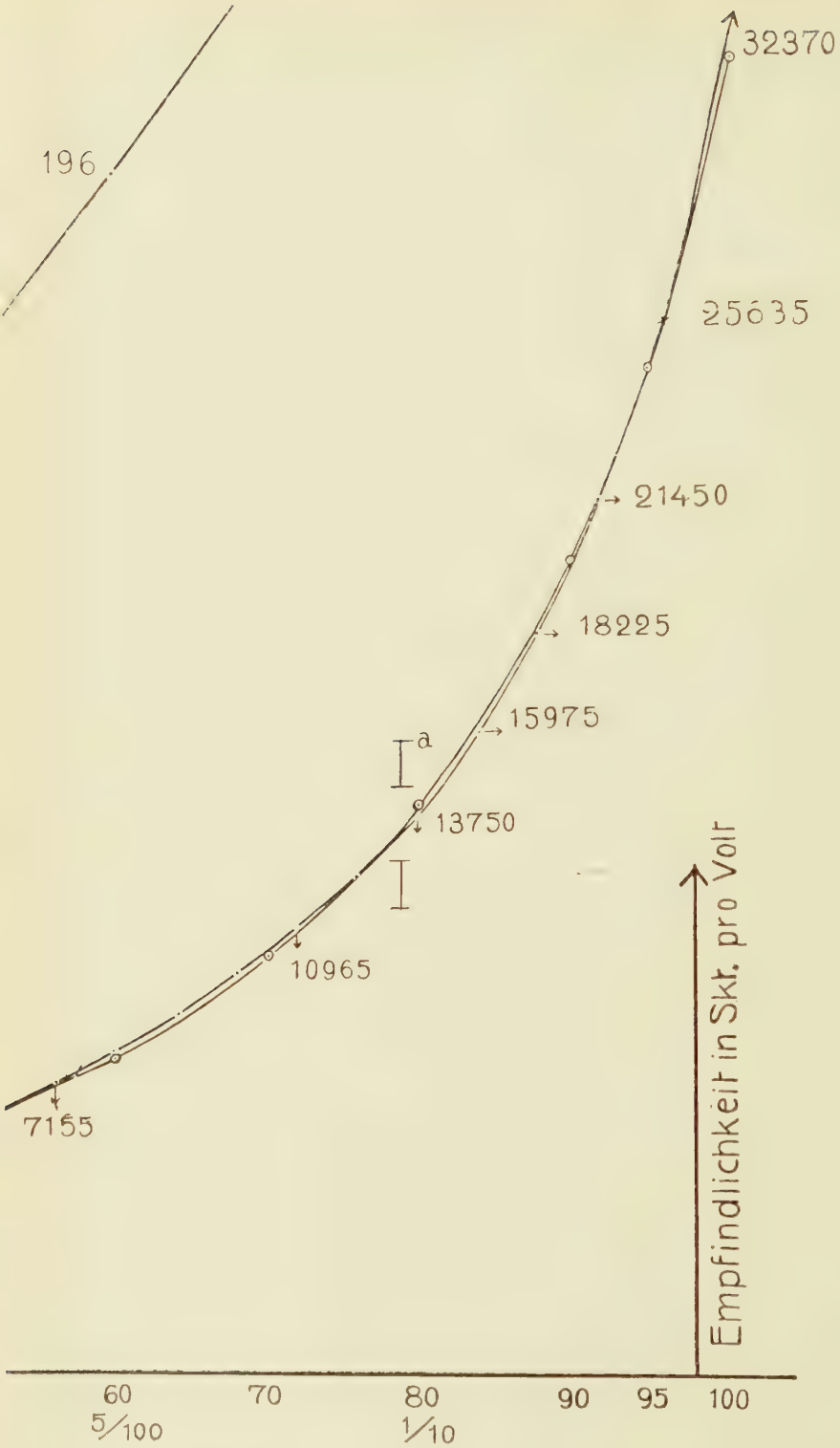
196
32370
25635
21450
18225
15975
a
13750
10965
7155
Empfindlichkeit in Skt. pro Volt
60
5/100
70
80
1/10
90
95
100

Tabelle III.

Werte der Beobachtungs-Kurve	Werte der analytischen Kurve	Δ	Δ^2
6,6	6,87	+ 0,3	0,09
14,0	13,5	— 0,5	0,25
21,7	21,4	— 0,3	0,09
30,5	29,9	— 0,6	0,36
41,2	39,6	— 1,6	2,56
53,5	52,5	— 1,0	1,0
69,6	68,7	— 0,9	0,09
91,7	92,7	+ 1,0	1,0
132,0	132,6	+ 0,6	0,36
163,9	164,0	+ 0,1	0,01
215,8	213,9	— 1,9	3,61
	$\Sigma \Delta$	$= -4,8$	
	$\Sigma \frac{\Delta}{n}$	$= -0,436$	
	$\Sigma \Delta^2$		$= 8,62$
	$\Sigma \frac{\Delta^2}{n}$		$= 0,783$

Die Uebereinstimmung des nach Orlichscher Methode gefundenen Koeffizienten D mit dem aus der Kurve abgeleiteten ist sehr befriedigend.

Nach Orlich berechnet $D = -6 \cdot 10^{-5}$.

Nach der Methode der kleinsten Quadrate $D = -7{,}115 \cdot 10^{-5}$.

Die Labilität der Nadel tritt dann auf, wenn nach den vorhergehenden Formeln

$$\alpha = \infty \text{, d. h. } 1 - DN^2 = 0.$$

wird. Daraus berechnet sich die kritische Spannung:

$$N_k = \sqrt{\frac{1}{D}}.$$

Für $D = 0{,}7115 \cdot 10^{-4}$ ergibt sich somit $N_k = 118$ Volt, ein Wert, der mit den tatsächlichen Verhältnissen befriedigend übereinstimmt. Dieser Wert ist zudem noch unabhängig von der Quadrantenladung Q_1, solange diese nicht eine gewisse Grenze überschreitet; denn der vollständige Ausdruck für den Nenner heisst nämlich für $Q_1 = 0$.

$$1 + DN^2 + BQ^2 + CQ_1 N,$$

während in der Rechnung nur die Grösse

$$1 + DN^2$$

berücksichtigt worden ist.

VI. Anwendungen.

Verwendung des Elektrometers zur Messung induzierter elektromotorischer Kräfte in ungeschlossenen Leitern.

Mit dem beschriebenen Instrument sind einige Messungen ausgeführt worden, die zum Teil mit den bisherigen Elektrometern, infolge der geringen Empfindlichkeit derselben, nicht möglich gewesen sind, und die in erster Linie die praktische Brauchbarkeit des neuen Instrumentes feststellen sollen.

1. Es wurde mit einem Erdinduktor gewöhnlicher Konstruktion durch Vergleichung der Vertikal- und Horizontal-Intensität der erdmagnetischen Kraft die magnetische Inklination bestimmt, wobei das Elektrometer ballistische Verwendung fand. Diese elektrometrische Bestimmung empfiehlt sich da, wo starke lokale Störungen des magnetischen Feldes die Verwendung geschlossener Stromkreise mit Galvanometern ausschliessen.

Die Empfindlichkeit betrug 33500 Skt. pro Volt. Dabei hat es die Meinung, dass Ruhelage und Empfindlichkeit während des mehrere Stunden dauernden Versuches konstant blieben. Anordnung und Ausführung des Experimentes sind ähnlich wie bei der Bestimmung mit Galvanometer. Wird der Erdinduktor, dessen Achse horizontal gelegt und in den magnetischen Meridian orientiert ist, rasch um 180° gedreht, so bewirkt die Aenderung des durch die Spulenfläche gehenden Induktionsflusses eine momentane Störung der elektrischen Verteilung im Spulendraht, eine elektrische Kraft, die das Elektrometer durch einen Ausschlag misst. Diese Ausschläge sind entgegengesetzt gleich für Drehungen in entgegengesetztem Sinn. Für obige Empfindlichkeit hat sich ein Ausschlag von 10,06 mm ergeben. Stellt man die Spule vertikal, die Normale der Windungsebene in die Nord-Südrichtung, so tritt bei Drehung des Induktors um 180° wiederum ein ballistischer Ausschlag auf, etwa halb so gross wie bei der ersten Spulenlage, im Mittel 5,96 mm, für entgegengesetzte Drehungen entgegengesetzt gleich. Diese Ausschläge können beliebig grösser erhalten werden durch Verwendung von 5000 und mehr Windungen eines dünnen Drahtes, da die elektrometrische Messung vom Widerstand unabhängig ist. Das Verhältnis der durch die vertikale und horizontale Komponente der erdmagnetischen Kraft erzeugten Ausschläge ist gleich der Tangente der Inklination. Diese wurde zu 61° 40′ 43″ gefunden, einem Wert, der mit solchen auf andere Weise gefundenen übereinstimmt.

Die Messungen wurden am folgenden Tag wiederholt. Es gibt somit Tabelle IV einen Einblick in die Konstanz zwischen Ruhelage, Empfindlichkeit und Ausschläge.

Tabelle IV.

Tag	Ruhelage	Nadelladung 76 Volt	Quadrantenladung $^2/_{1000}$ Volt	Δ	Empfindlichkeit
20. XI. α	601,3	552,0	485,0	67	33 500
21. XI. α	601,8	553,0	486,0	67	33 500

2. Ferner sind mit dem gleichen Instrument Messungen ausgeführt worden zum Nachweis elektrischer Kraft im ungeschlossenen

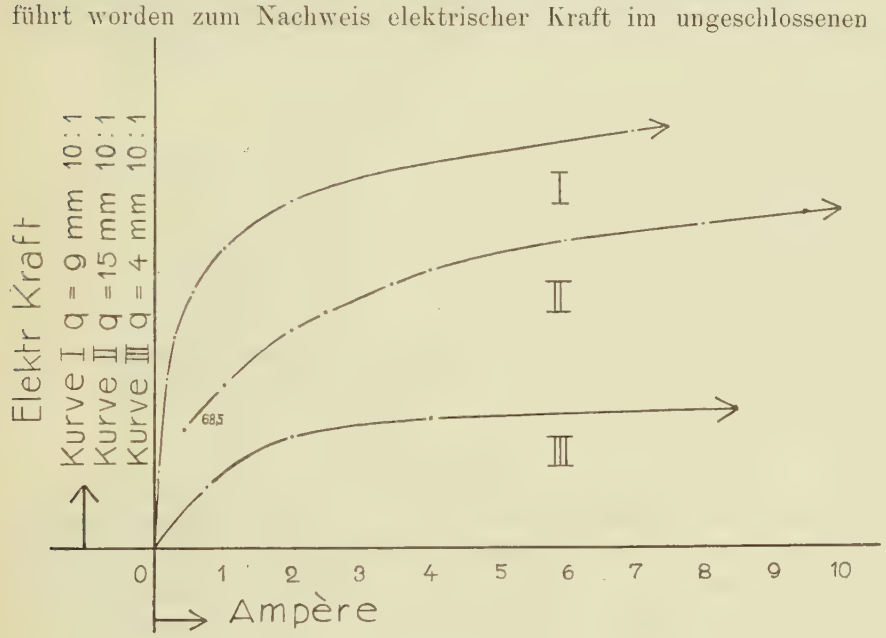

Fig. 15.

Leiter, hervorgerufen durch magnetische Schiebungsströme in einer Eisendrahtspirale, die zwischen die Pole eines Elektromagneten eingeklemmt ist.

Durch diese Eisendrahtspirale ist ein Kupferdraht isoliert durchgeführt. Ein Ende desselben liegt an Erde mit dem einen Quadrantenpaar, das andere ist mit den Messquadranten verbunden. Die Empfindlichkeit beträgt 43900 Skt. pro Volt. Beim Entstehen und Verschwinden des magnetischen Feldes zeigt nun das Elektrometer Ausschläge an von gleicher Grösse, aber entgegengesetzter Richtung.

Wird das Magnetfeld durch einen Strom von 10 Ampère erregt, so bewirkt der Schiebungsstrom durch eine Eisendrahtspirale von 10 mm Drahtquerschnitt und 25 cm Spiralenlänge bei der genannten Empfindlichkeit einen Ausschlag am Elektrometer von 8 Skt., während eine andere Spirale von 20 mm Drahtquerschnitt 15,2 Skt. Ausschlag erzeugt. Die Untersuchungen sind an mehreren Eisendrahtspiralen ausgeführt worden, wie aus Fig. 15 hervorgeht, wo Kurve I das Verhalten der elektrischen Kraft für eine Eisenspirale (aus dem besten schwedischen, weichen Eisen hergestellt) von 9 mm Dicke und 21 Windungen darstellt; Kurve II gilt für eine solche von 15 mm Dicke mit 15 Windungen und Kurve III ist durch eine 4 mm dicke Eisendrahtspirale erhalten worden (11 cm lang, 18 Windungen).

Aus den vorläufigen Resultaten geht hervor, dass die durch die Induktion im Innern der Eisendrahtspirale im Leiter erregte elektrische

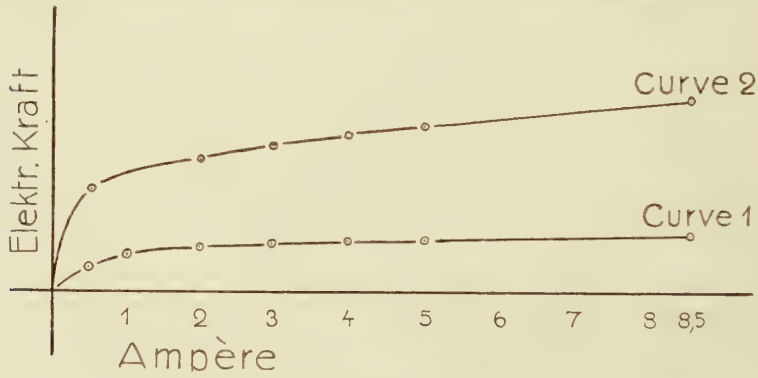

Fig. 16.

Kraft im weiten Messbereich, Kurve I, Fig. 16, annähernd proportional ist dem Durchmesser des Spiralendrahtes, Tabelle V, und der magnetisierenden Kraft, Fig. 16, wo in Kurve 2 der magnetische Kraftfluss durch die mittlere Windung mit Hilfe einer Probespule von 40 Windungen galvanometrisch gemessen wurde.

Tabelle V.

Spirale	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Ampère . . .	4	4	4	4	4	4
Durchmesser .	4 mm	8 mm	9 mm	10 mm	15 mm	20 mm
Empfindlichkeit	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000
Ausschlag . .	2,3	4,5	5,1	5,6	8,6	11,13
Länge	11 cm	25 cm	25 cm	25 cm	25 cm	25 cm
Windungszahl .	18	22	21	19	15	11

Dass es sich bei diesen Versuchen nicht um blosse Störungen handelt, ist durch eine Reihe von Kontrollversuchen festgestellt worden. So wurde statt der Eisenspirale eine gleichdimensionierte aus Kupfer eingesetzt und ferner der Kupferdraht, der sonst durch die Eisenspiralen isoliert durchgeführt war, allein im Magnetfeld belassen. Es zeigten sich keine wirkenden Kräfte im Elektrometer. Es wurde auch versucht, die magnetischen Kraftlinien mehrmals um den Leiter herumzuführen, indem eine dreifach übereinander

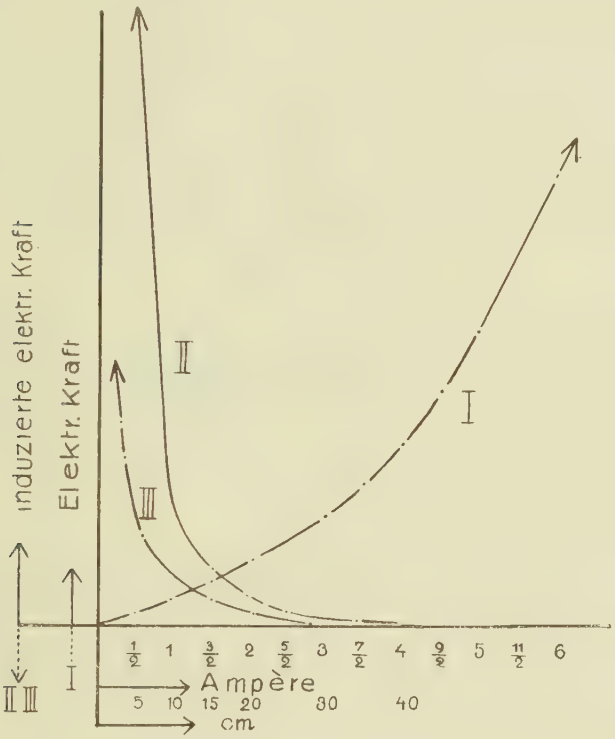

Fig. 17 und 19.

gewundene Spirale verwendet wurde. Allein sie lieferte geringere, höchstens gleiche elektrische Kräfte wie die einfach gewundenen. Im fernern ist der Effekt in eng und weit gewundenen Spiralen untersucht worden und ebenso in solchen von kleinem und grossem innerem Durchmesser. Es hat sich gezeigt, dass im allgemeinen Spulen von kleinem innerm Durchmesser und geringem Windungsabstand die grössern Effekte liefern. Eine Abhängigkeit von der Zahl der Windungen hat nicht sicher festgestellt werden können.

3. In folgendem Versuch wurde das Instrument in idiostatischer Schaltung verwendet.

Ein offener Leiter in Stabform L_1 und L_2, Fig. 18, bewegt sich mit konstanter Winkel-Geschwindigkeit in einem ringförmigen magnetischen Felde, das durch einen zylinderförmigen Elektromagneten M im Innern einer dickwandigen Eisenröhre E erzeugt wird, so dass die Kraftlinien im Hohlraum radial verlaufen. Der Leiter ist mit einem Quadrantenpaar des Elektrometers verbunden, die Nadel liegt an Erde, das andere Quadrantenpaar ist mit $^2/_{10}$ Volt geladen. Wird durch den primären Strom das Magnetfeld geändert, so ändert sich auch die im offenen Leiter induzierte elektromotorische Kraft, wie aus der Kurve I von Fig. 19 hervorgeht.

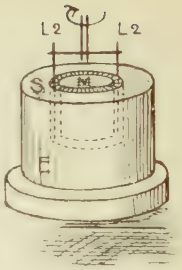

Fig. 18.

4. Kurve II und III, Fig. 19, stellen die magnetische Induktion in einem andern offenen Leiter (Induktorium am Elektrometer) und ihre Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Elektromagnet und

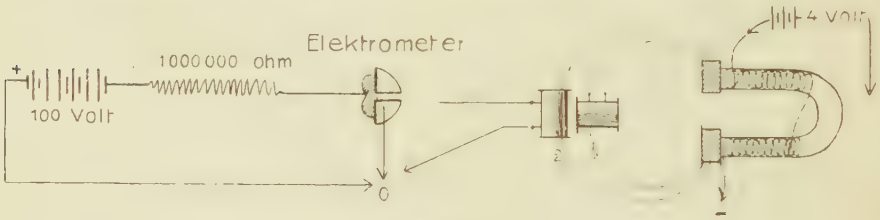

Fig. 20.

Induktorium dar. Fig. 20. Kurve II, Fig. 19, gilt für Stellung 2, Kurve III, Fig. 19, für Stellung 1 in derselben Entfernung vom Elektromagneten. Mit einem grössern Induktorium und stärkern Elektromagneten kann man bis auf mehrere Meter in der für das Experiment günstigeren Stellung 2 des Induktoriums die elektrische Kraft direkt messen.

5. Mit einer Elektrometer-Empfindlichkeit von 21 500 Skt. pro Volt wurde endlich ein Thermoelement, Kupfer-Konstantan, zwischen $-15°$ und $+344°$ geeicht. Der fast lineare Verlauf zwischen Temperaturdifferenz und elektromotorischer Kraft ist in Fig. 21, Kurve Ia, dargestellt. Kurve Ib gibt direkt die den einzelnen Temperaturdifferenzen entsprechenden Millivolt an. In den Kurven IIa und IIb ist die thermoelektrische Kraft mit Galvanometer und Elektrometer nebeneinander gemessen graphisch dargestellt. Galvanometer-Empfindlichkeit $4{,}7 \cdot 10^{-10}$, Elektrometer-Empfindlichkeit $0{,}205 \cdot 10^{-7}$. Durch Multiplikation der Kurve IIb mit dem Faktor 4,633 geht sie in die Kurve IIa über.

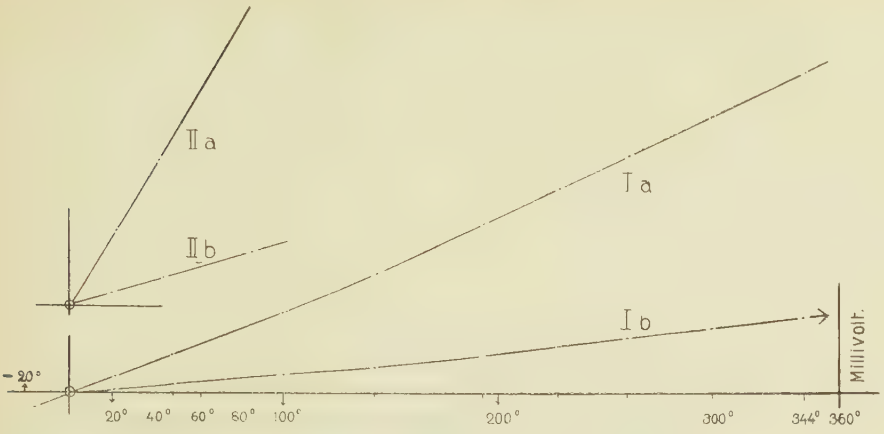

Fig. 21.

VII. Schluss.

Die obigen Anwendungen, die mit den alten Quadranten-Elektrometern der geringen Empfindlichkeit wegen teilweise nicht ausgeführt werden konnten, haben somit die praktische Brauchbarkeit des neuen Instrumentes selbst für die hohen Empfindlichkeiten von 20 000 bis 50 000 Skalenteilen pro Volt dargetan. Es ist somit möglich geworden, die elektrischen Kräfte direkter zu messen als mit dem Galvanometer in geschlossenen Kreisen. Besonders da, wo grosser Widerstand und Polarisation galvanometrisches Arbeiten unmöglich machen, dann auf dem Gebiete der radioaktiven Strahlung usw. wird das neue Instrument von Bedeutung werden.

Diese Arbeit ist im physikalischen Institut der Universität Zürich ausgeführt worden.

Ich erlaube mir, dem Leiter des Instituts,

Herrn Prof. Dr. A. Kleiner,

dem ich die Anregung zu dieser Arbeit verdanke, für die Ratschläge, für den regen Anteil, den er am Gang der Untersuchungen genommen hat, sowie für sein persönliches Wohlwollen aufrichtig zu danken.

Zürich, Januar 1914.

Curriculum vitae.

Karl Mülly, geb. 1877 in Zürich, besuchte die Volksschulen seiner Vaterstadt, trat 1893 ins Lehrerseminar in Küsnacht ein, wurde 1897 als Primarlehrer patentiert, liess sich im gleichen Jahr an der Universität Zürich als Lehramtsschüler immatrikulieren, bestand 1899 die Prüfung als Sekundarlehrer, amtete bis 1902 an der Sekundarschule in Andelfingen, hielt sich zur weitern Ausbildung ein Jahr in England auf, wirkte von 1903—1907 als Sekundarlehrer in Zürich 6, erfüllte seine Bürgerpflicht als Soldat und Offizier und ist seit 1907 als Turnlehrer an der Kantonsschule Zürich tätig.

Im Jahr 1903 begannen (neben dem Beruf) die Studien zur Weiterbildung; im Laufe der Jahre wurden dann die Prüfungen in Mineralogie, Chemie, Astronomie und Mathematik abgelegt, und von 1910 an erforderte die Ausarbeitung der Dissertation, die 1913 zu Ende geführt wurde, die Anspannung aller Kräfte.